

УДК 633.9:631.54

DOI: <https://doi.org/10.47414/nr.31.2023.292403>

Формування врожайності та якості проса прутоподібного за багаторічного його вирощування на малопродуктивних ґрунтах Правобережного Лісостепу України

О. І. Присяжнюк^{1*}, В. В. Мусіч¹, Т. П. Костина², Н. О. Кононюк¹,
М. О. Черняк¹, О. М. Гончарук¹, Є. В. Качура³

¹Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, *e-mail: ollpris@gmail.com

²ТОВ «БАСФ Т.О.В.», б-р Миколи Міхновського, 19, м. Київ, 01042, Україна

³Інститут агроекології і природокористування НААН України, вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна

Мета. Установити вплив елементів технології вирощування проса прутоподібного на особливості формування врожайності та якості його біомаси. **Методи.** Дослідження проводили у 2019–2022 рр. на Уладово-Льолинецькій ДСС Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН за загальноприйнятими методиками. Просо прутоподібне ‘Морозко’ вирощували за схемою трифакторного польового досліду: фактор А – розкислення ґрунту: 1) без вапнування, 2) вапно, 1,6 т/га; фактор Б – застосування адсорбенту: 1) без адсорбенту, 2) МахіМарін гранульований, 30 кг/га; фактор В – позакореневе підживлення: 1) без підживлення, 2) Гуміфілд, 50 г/га; 3) Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га. Адсорбент вносили за два тижні перед сівбою культури локально в рядки, позакореневе підживлення рослин проводили у фазі кушіння та повторно через два тижні. **Результати.** За результатами досліджень урожайності плантацій проса прутоподібного встановлено, що на четвертий рік вегетації рослини досягли свого піку продуктивності. Якщо на третій рік вегетації продуктивність зростає на 60 % порівняно з другим роком, то на четвертий рік приріст становив лише 8,94 %. Це дає змогу отримувати в середньому 6,25 т/га сухої речовини. Вапнування ґрунту було найбільш ефективним на перший рік вегетації, коли коренева система рослин перебувала в зоні внесення вапна, що сприяло утворенню додаткових 0,12 т/га сухої речовини. На четвертий рік заходи з розкислення ґрунту мали значніший вплив, збільшуючи врожайність на 0,14 т/га. Цей вплив можна пояснити підвищенням рівня зволоження ґрунту в останні два роки, коли кількість опадів зростає до рівня багаторічної норми. На четвертий рік вегетації помітно посилюється вплив усіх агротехнічних заходів на продуктивність плантацій проса прутоподібного. Коренева система рослин активно освоювала верхні шари ґрунту в пошуках вологи та поживних речовин, що посилювало ефект від вапнування та застосування адсорбенту. **Висновки.** Виявлено, що у варіанті вапнування ґрунтів та використання адсорбенту МахіМарін гранульований разом з позакореневим підживленням Гумат калію (Гуміфілд) і антистресантом АміноСтар, урожайність становила 6,87 т/га. У варіанті вапнування ґрунтів, 25 % від потреби, із застосуванням адсорбенту МахіМарін гранульований та позакореневим підживленням, вихід енергії з урожаєм досягав 116,2 ГДж/га. Щодо вмісту клітковини, найкращі показники були отримані за умови використання вапна з адсорбентом МахіМарін гранульований та позакореневим підживленням – 37,1 % у листках та 44,7 % у стеблах. У варіантах з вапнуванням ґрунту вміст золи в листках проса прутоподібного становив 9,54 %, а в стеблах – 2,87 %, що на 1,91 та 1,41 % менше, ніж у варіантах без вапнування. Інші фактори також показували зниження вмісту золи, але в межах похибки досліду. Установлено рівняння множинної регресії для прогнозування врожайності проса прутоподібного залежно від фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу: $y = -3,25 + 1,34 \text{ ФП} + 21,0 \text{ ЧПФ}$. Усі коефіцієнти рівняння достовірні на 5 %-му рівні значущості, і воно пояснює майже 98 % варіації залежної змінної.

Ключові слова: вапнування ґрунту; внесення адсорбенту; позакореневе підживлення; урожай сухої речовини; вихід енергії; якість біомаси.

Вступ

Просо прутоподібне – багаторічна трав'яниста рослина із C₄-типом фотосинтезу, що є одним з найбільш придатних джерел сировини для виробництва біопалива [1–4] і має значний потенціал урожайності на різних ділянках і типах ґрунтів [5–7]. Крім того, ця культура має здатність добре рости на маргінальних землях з мінімальними вимогами щодо добрив і пестицидів [8, 9]. У багатьох регіонах цінується його здатність щорічно формувати декілька врожаїв біомаси за багаторазового її збирання, що дає змогу вважати цю культуру універсальною, придатною до використання як на корм ВРХ, так і для споживання як біоенергетичної сировини [10–15]. Ще однією перевагою проса прутоподібного є те, що його досить просто вирощувати та можна збирати за допомогою обладнання для заготівлі сіна [16, 17].

Отримання високих показників виробництва біопалива вимагає оптимізації виходу біомаси та її якості, що досягається за рахунок створення добрих умов для росту й розвитку рослин проса прутоподібного [3, 18]. Ідеальне біопаливо характеризується мінімальним вмістом вологи, золи, азоту (N), калію (K) і сірки (S) [16, 19]. Компонент золи є вирішальним при оцінюванні придатності біомаси для процесів спалювання [20, 21].

Підвищені концентрації лужних металів і силікатів у золі відіграють вирішальну роль в утворенні шлаку, щільної темної рідкої речовини, що утворюється, коли вихідна сировина піддається спалюванню за підвищених температур. Накопичення шлаку на поверхнях машин, таких як печі, котли та киплячі шари, призводить до забруднення, що перешкоджає рекуперації тепла [22–24]. Ця проблема потенційно може зробити процес спалювання непомерно дорогим.

Привабливість вирощування проса прутоподібного полягає в тому, що його можна використовувати з наявними технологіями переробки та спалювання, для доповнення поточних енергетичних систем. Українською важливо, щоб кінцевий продукт можна було використовувати, не створюючи високих зовнішніх витрат на наявні системи. Адже на кожні 10 г/кг збільшення золи, відбувається зниження теплотворної здатності на 0,2 МДж/кг, що підкреслює важливість оптимізації рівня золи для підтримки ефективного виробництва енергії [25–27].

Зменшення вмісту золи пов'язане з переміщенням рухомих поживних речовин із наземної біомаси до підземних тканин (кореневищ) [3, 17]. Ближче до кінця вегетаційного періоду азот, як правило, циклічно потрапляє в підземні тканини, оскільки рослини перебувають у стані спокою та переміщують поживні речовини, включаючи азот, з наземної поверхні в підземну для подальшого відростання в наступному сезоні [3].

Побуває думка, що за вирощування проса прутоподібного на кислих ґрунтах зростає вміст у сухій масі рослин золи та різних шкідливих мікроелементів. Зокрема, за зниження рН нижче 5,5 різко підвищується доступність алюмінію та марганцю. Їхня концентрація у ґрунтовому розчині може досягти токсичного для культур рівня і відповідно ці елементи легко поглинаються та накопичуються в рослині, а потім – концентруються в золі [28–30].

Отже, дослідження елементів агротехнологій проса прутоподібного в умовах вирощування його на малопродуктивних землях є актуальним питанням, особливо з позицій підвищення якості отримуваної сировини як компонента переробки на біопаливо.

Мета досліджень – установити вплив елементів технології вирощування проса прутоподібного на особливості формування врожайності та якості його біомаси.

Матеріали та методика досліджень

Полеві дослідження проводили на Уладово-Люлинецькій дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН упродовж 2019–2022 рр. згідно зі схемою досліді, наведеною в таблиці 1.

Ґрунт дослідного поля – чорнозем глибокий малогумусний вилугуваний піскуватий середньосуглинковий, що характеризується середньою забезпеченістю мінеральним азотом (нітратний – 16,4 мг/кг та амонійний – 38,7 мг/кг ґрунту). Уміст гумусу в орному шарі (0–

30 см) становить 3,9 %, а забезпеченість рухомим фосфором низька (8,3 мг/кг ґрунту) та підвищена – обмінним калієм (10,3 мг/кг ґрунту). Реакція ґрунтового середовища кисла (рН 5,1), а Нг – 4,2 мг-екв/100 г ґрунту (підвищена). Тому, не зважаючи на сприятливу для вирощування біоенергетичних культур решту чинників живлення ґрунту, значна кислотність призводить до малодоступності рослинам основних елементів живлення та низької схожості насіння.

Таблиця 1

Схема дослід з вирощування проса прутіподібного на маргінальних землях

Розкислення ґрунту	Застосування адсорбенту	Позакореневе підживлення
Без вапнування	Без адсорбенту	Без підживлення
		Гуміфілд, 50 г/га
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га
	МахіМарін гранульований, 30 кг/га	Без підживлення
		Гуміфілд, 50 г/га
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га
Вапнування, 1,6 т/га	Без адсорбенту	Без підживлення
		Гуміфілд, 50 г/га
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га
	МахіМарін гранульований, 30 кг/га	Без підживлення
		Гуміфілд, 50 г/га
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га

Погодні умови, що склались в роки проведення польових досліджень, були типовими для зони нестійкого зволоження Лісостепу України, мали відхилення від середньобогаторічних їх значень, однак це не стало на заваді отриманню об'єктивних експериментальних даних.

Площа посівної ділянки 35 м², облікової – 25 м², повторність – триразова. У досліді висівали сорт проса прутіподібного 'Морозко', селекції ІБКіЦБ НААН.

Адсорбент уносили за два тижні перед сівбою проса прутіподібного локально в рядки, позакореневе підживлення рослин проводили у фазі кущіння та повторно через два тижні.

Для визначення стандартної норми застосування вапна [D – норма вапна (CaCO₃), т/га] для розкислення ґрунту проводили розрахунки за формулою: $D = 0,05 \times Hg \times h \times d$. У стандартному повному варіанті застосування потрібно внести: $0,05 \times 4,2 \times 25 \times 1,22 = 6,40$ т/га вапна CaCO₃, а 25 % від потреби становить 1,6 т/га.

Експериментальні дослідження проводили згідно з методиками польового дослідження та спеціальними методиками [31–33].

Результати дослідження

Створення умов для досягнення максимально економічно вигідного врожаю можливе лише шляхом оптимізації технології вирощування проса прутіподібного через раціональне використання всіх факторів. Правильний добір і застосування елементів технології вирощування дає змогу регулювати ріст і розвиток рослин на різних стадіях органогенезу, прискорювати або уповільнювати досягання тощо.

Варто зазначити, що загалом продуктивність проса прутіподібного першого року вегетації була відносно низькою. Зокрема, на контрольних ділянках рослини формували в середньому 1,83–1,85 т/га сухої речовини, а середня по всіх варіантах урожайність становила 2,52 т/га.

Слід зазначити, що розкислення ґрунту не впливало на збільшення врожайності рослин першого року вегетації, і різниця між варіантами з вапнуванням та без нього в середньому становила 0,12 т/га сухої речовини (рис. 1). Для росту й розвитку рослин першого року

РОСЛИННИЦТВО

вегетації запасів поживних речовин, наявних у ґрунтовому розчині, було достатньо, тому зменшення рухомості фосфору та калію за високої кислотності не вплинуло негативно на формування врожайності культури.

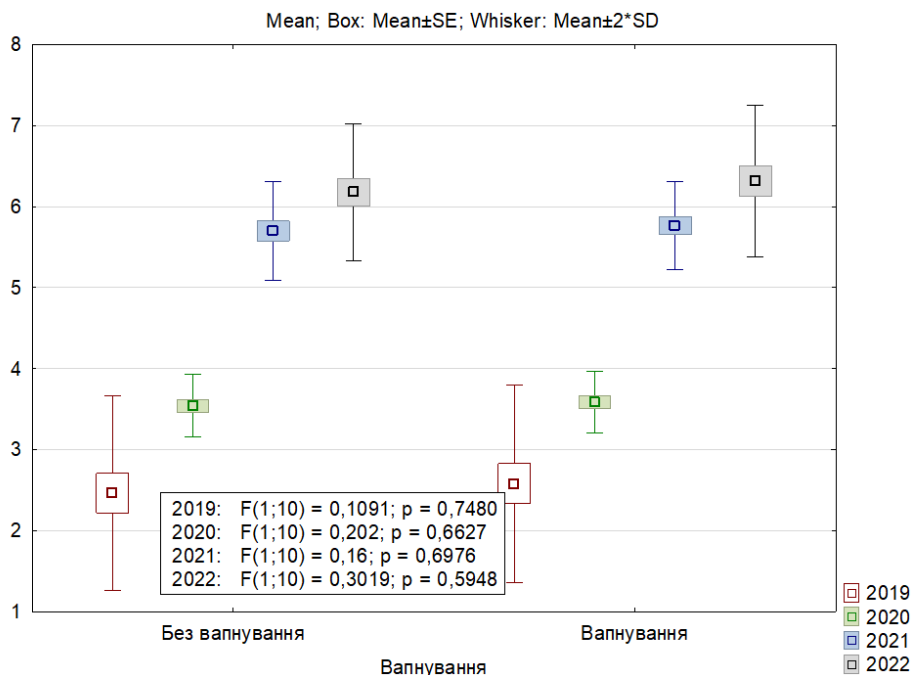


Рис. 1. Урожайність проса прутоподібного за ваннування ґрунтів

При внесенні адсорбенту рослини проса прутоподібного отримували додаткову вологу, що було важливим для їх ефективного росту й розвитку, особливо в умовах 2019 року, коли за вегетаційний період випало 352,5 мм опадів за багаторічної норми 397,0 мм. Варіанти з використанням вологоутримувача MaxiMarin забезпечували накопичення в середньому на 1,06 т/га більше сухої маси (рис. 2).

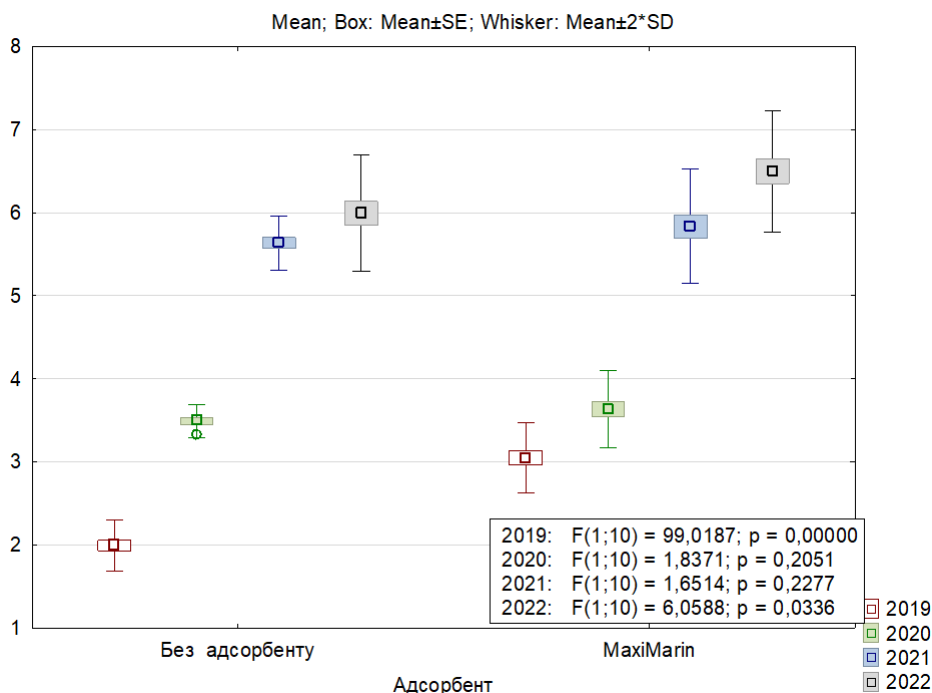


Рис. 2. Урожайність проса прутоподібного за використання вологоутримувача MaxiMarin

Також ми спостерігали позитивний вплив у разі застосування позакореневого удобрення посівів проса прутіподібного препаратами, які стимулюють ростові процеси та зменшують негативний вплив стресів на рослини. У середньому на ділянках з позакореневим підживленням врожайність була на 0,27 т/га вищою (рис. 3).

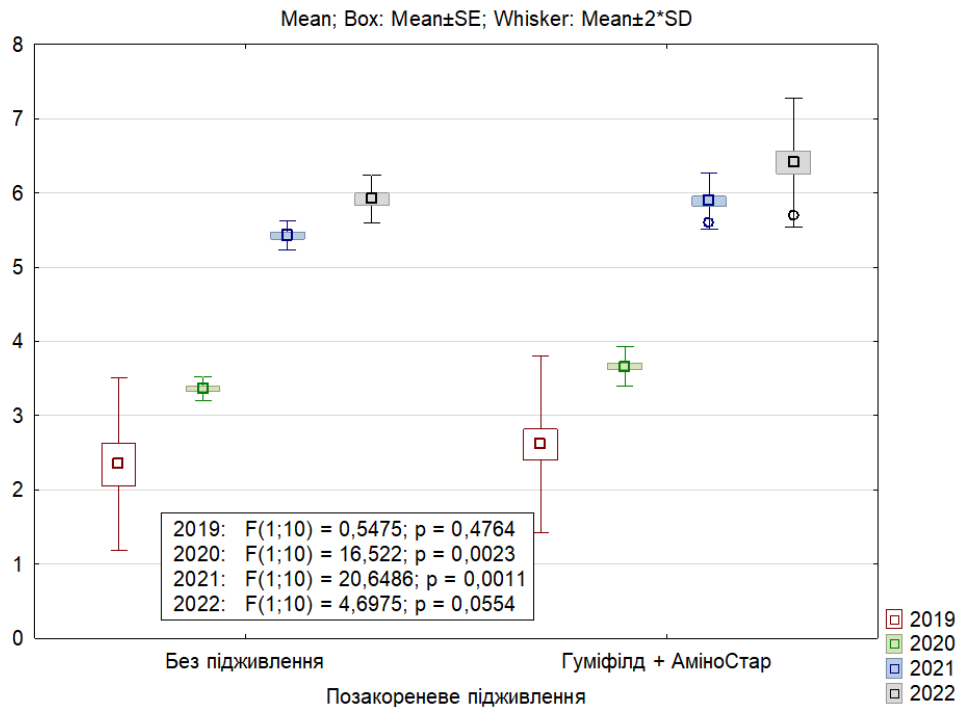


Рис. 3. Урожайність проса прутіподібного за позакореневого підживлення

Максимальні показники врожайності проса прутіподібного були зафіксовані у варіантах з використанням вологоутримувача MaxiMarin у поєднанні з подальшим позакореневим підживленням гуматами. Зокрема, у варіанті з адсорбентом MaxiMarin та позакореневим підживленням Гуміфілд + АміноСтар урожайність становила 3,21–3,36 т/га.

Ми вважаємо, що цей ефект адсорбенту пов'язаний, перш за все, з дефіцитом опадів у вегетаційний період 2019 року, а також з тим, що рослини проса прутіподібного першого року вегетації мали слабо розвинену кореневу систему, яка залежала від доступності ґрунтової вологи. Використання вологоутримувача дає змогу ефективно утримувати капілярну та конденсаційну вологу, забезпечуючи кореневу систему, розташовану у верхньому шарі ґрунту, додатковими кількостями доступної вологи.

Щодо виходу енергії з отриманим урожаєм, то плантації першого року вирощування не можуть використовуватися промислово, але ми розрахували показник для порівняння з даними наступних років вирощування. Як і врожайність на контрольних варіантах досліду, вихід енергії був мінімальним – 30,4–30,5 ГДж/га. Установлено, що різниця між варіантами з вапнуванням та контрольними ділянками становила в середньому 1,84 ГДж/га, що свідчить про незначні відмінності. Отже, дані щодо виходу енергії ідентичні змінам показників врожайності проса прутіподібного першого року вегетації.

Позитивний вплив на зростання виходу енергії з продукцією спостерігався також при застосуванні позакореневого удобрення препаратами, які стимулюють ростові процеси та зменшують негативний вплив стресів на рослини. На ділянках з позакореневим підживленням вихід енергії був вищим на 4,43 ГДж/га.

Варіанти з використанням вологоутримувача MaxiMarin створювали кращі умови для вологозабезпечення рослин проса прутіподібного, що сприяло підвищенню виходу енергії на 17,62 ГДж/га.

Не дивно, що комплексне застосування факторів впливало на формування виходу енергії. У варіанті з адсорбентом MaxiMargin та позакореневим підживленням Гуміфілд + АміноСтар цей показник становив 53,3–55,7 ГДж/га. Кращі умови вологозабезпечення рослин сприяли ефективнішій дії позакореневого підживлення, що допомагало долати стрес від високої кислотності ґрунту.

Розкислення ґрунту та внесення адсорбенту ми здійснювали на початку закладання плантації проса прутюподібного, тому ці фактори мають одноразову пролонговану дію. Оскільки рослини вирощувалися на одному полі й у наступні роки вегетації, а ґрунт не піддавався механічному впливу, який міг би перемістити ці фактори в недосяжні для рослин шари, ефективність їх дії зберігалася. Вапно локально розкислює шар ґрунту і не має терміну дії, а адсорбент працює протягом 10 років, після чого розкладається на сполуки калію. Отже, як вапно, так і вологоутримувач діють протягом усього періоду експлуатації плантації проса прутюподібного і їх вплив зникає лише при переорюванні плантації.

Такі заходи, як позакореневе підживлення, ми застосовували щорічно, оскільки рослини проса прутюподібного щорічно піддавалися негативним факторам навколишнього середовища, а дози застосування препаратів і особливості їх засвоєння рослинами не дозволяють накопичити їх на кілька років наперед.

Під час росту й розвитку рослин проса прутюподібного ми фіксували різні біометричні параметри рослин. Вони закономірно позначилися в особливостях накопичення біомаси та формування врожайності сухої маси, які варто описати детальніше. Продуктивність рослин другого року вегетації є показником загальної продуктивності плантації проса прутюподібного та її тривалої експлуатації в наступні роки.

Загальна продуктивність проса прутюподібного другого року вегетації була на 41 % вищою порівняно з першим роком – 3,56 т/га проти 2,52 т/га. На контрольних варіантах досліді рослини формували в середньому 3,33–3,43 т/га сухої речовини.

Аналогічно попередньому року досліджень, заходи з розкислення ґрунту не мали значного впливу на зміну врожайності, і різниця між варіантами з вапном та без нього становила в середньому лише 0,05 т/га.

На другий рік вегетації рослини проса прутюподібного добре вкорінилися, тому внесення адсорбенту не дало такого приросту врожайності, як у перший рік вегетації в умовах 2019 року. У 2020 році опадів випало 352,1 мм за багаторічної норми 397,0 мм. Варіанти з вологоутримувачем MaxiMargin забезпечили в середньому на 0,14 т/га більше сухої маси порівняно з контрольними варіантами. Потужна коренева система, утворена в перший рік, зіграла свою роль у забезпеченні рослин вологою на другий рік.

У разі застосування позакореневого удобрення препаратами, що стимулюють ростові процеси та зменшують негативний вплив стресів на рослини, ми спостерігали збільшення позитивного ефекту. У середньому на ділянках з позакореневим підживленням урожайність була на 0,30 т/га вищою.

Максимальні показники врожайності проса прутюподібного були зафіксовані за використання вологоутримувача MaxiMargin у поєднанні з позакореневим підживленням гуматами. У варіанті з адсорбентом MaxiMargin та підживленням Гуміфілд + АміноСтар урожайність становила 3,77–3,83 т/га.

Дослідження також показали, що на контрольних варіантах вихід енергії з урожаєм був мінімальним – 55,0–57,3 ГДж/га. Різниця між варіантами з вапнуванням та контрольними варіантами становила в середньому 0,72 ГДж/га, що знаходиться в межах похибки досліді.

Варіанти з вологоутримувачем MaxiMargin забезпечували в середньому на 2,54 ГДж/га більше енергії з плантації другого року вегетації. При позакореневому удобренні препаратами, що стимулюють ростові процеси та зменшують негативний вплив стресів, вихід енергії був на 4,93 ГДж/га вищим.

Отже, за комплексного застосування факторів у варіанті з адсорбентом MaxiMargin та позакореневим підживленням Гуміфілд + АміноСтар, показник виходу енергії був на рівні 63,7–63,8 ГДж/га.

На третій рік вегетації плантації багаторічних біоенергетичних культур переходять з розряду новостворених до комерційно експлуатованих, забезпечуючи достатні обсяги біомаси для подальшої переробки на тверді види палива. У цей час основні процеси формування плантацій завершуються, і ми маємо справу з добре розвиненими рослинами, здатними накопичувати значні кількості біомаси. Важливо оцінити не лише продуктивність плантацій, але і їхню здатність до виробничого використання для отримання якісного біопалива.

Відомо, що агротехнічні операції, спрямовані на закладання плантацій біоенергетичних культур, не завжди ефективні в умовах промислового вирощування. Наприклад, стартові дози мінерального удобрення, які ефективні на початку росту й розвитку, мало дієві при високій потребі рослин в елементах живлення, особливо азоті. Тому слід ретельно вивчати ефективність різних факторів, які впливають на ріст, розвиток та продуктивність багаторічних плантацій проса прутоподібного.

Хоча деякі досліджувані фактори мають одноразове застосування (розкислення ґрунту та внесення адсорбенту), інші – щорічне (позакореневе удобрення), тільки оцінка рівня продуктивності дає змогу всебічно оцінити їхню дієвість.

У середньому по досліді, продуктивність проса прутоподібного третього року вегетації була на 60 % вищою порівняно з другим роком – 5,70 проти 3,56 т/га. На контрольних варіантах врожайність сухої речовини становила в середньому 5,4–5,5 т/га.

Як і в попередні роки, заходи з розкислення ґрунту не мали значного впливу на врожайність проса прутоподібного, забезпечуючи в середньому лише на 0,07 т/га сухої речовини більше. На третій рік вегетації застосування вологоутримувача *MaxiMarin* сприяло утворенню на 0,20 т/га більше сухої речовини порівняно з варіантами без його використання. Позакореневе підживлення збільшило врожайність на 0,46 т/га.

Максимальна врожайність сухої біомаси проса прутоподібного була зафіксована за використання вологоутримувача *MaxiMarin* у поєднанні з позакореневим підживленням гуматами. У варіанті з адсорбентом *MaxiMarin* та підживленням Гуміфілд + АміноСтар врожайність становила 6,1 т/га.

На третій рік вегетації плантації проса прутоподібного показали високу ефективність для виробничого використання, забезпечивши середній вихід енергії з біомаси на рівні 96,1 ГДж/га.

Аналізуючи вплив агротехнічних факторів на енергетичний вихід, найбільш ефективними виявилися застосування адсорбенту, яке підвищило вихід енергії на 3,70 ГДж/га, та позакореневе підживлення – на 7,73 ГДж/га.

Найвищі показники енергетичного виходу з біосировини проса прутоподібного були досягнуті при використанні вологоутримувача *MaxiMarin* у поєднанні з позакореневим підживленням гуматами. Зокрема, застосування адсорбенту *MaxiMarin* та позакореневого підживлення Гуміфілд + АміноСтар забезпечило вихід енергії на рівні 102,4–102,5 ГДж/га.

На четвертий рік вегетації плантації багаторічних біоенергетичних культур продовжували активно зростати, досягнувши стадії, де інтенсивність приросту біомаси почала знижуватися, виходячи на стабільний рівень високої продуктивності. Зростання, характерне для перших років, зменшується, густина посівів і розвиток кореневої системи стають оптимальними, що призводить до посиленої конкуренції між рослинами, які максимально ефективно використовують доступні поживні речовини.

Якщо на третій рік вегетації середня продуктивність проса прутоподібного була на 60 % вищою порівняно з другим роком, то на четвертий рік цей показник збільшився лише на 8,94 %. Практика показує, що в подальшому інтенсивність приросту продуктивності зменшується, і на 6–7 рік експлуатації спостерігається поступове зниження врожайності.

На четвертий рік вегетації на контрольних варіантах досліді рослини проса прутоподібного формували в середньому 5,73–5,83 т/га сухої речовини. Заходи з розкислення ґрунту почали більш суттєво впливати на зміну врожайності, забезпечуючи в середньому на 0,14 т/га більше сухої речовини. Це систематичне, хоча й незначне підсилення

ефекту пов'язане зі збільшенням рівня зволоження за останні два роки. У перші два роки вегетаційного періоду випадало на 44,5 та 44,9 мм опадів менше за багаторічну норму, а у 2021-му різниця становила лише 7,6 мм, а у 2022 році – 13,5 мм. Підвищена вологість ґрунту, ймовірно, підвищила активність кислотності та її вплив на ріст і розвиток рослин.

Роль адсорбенту також посилилася, що пов'язано з активнішим розвитком вторинної кореневої системи у верхніх шарах ґрунту, де знаходяться гранули вологоутримувача і спостерігається нижчий рівень кислотності. Використання вологоутримувача MaxiMarin забезпечило збільшення врожайності на 0,51 т/га.

Крім того, використання позакореневого удобрення традиційно давало добрий результат, збільшуючи врожайність на 0,50 т/га. Рослини потребують дедалі більше поживних речовин, а коренева система освоює нові шари ґрунту, що посилює внутрішньовидову конкуренцію і підвищує ефективність засвоєння позакореневого удобрення з кожним роком.

Аналогічно попереднім рокам досліджень, максимальні показники врожайності сухої біомаси проса прутіподібного були досягнуті за використання вологоутримувача MaxiMarin у поєднанні з подальшим позакореневим підживленням гуматами. Установлено, що у варіанті з вапнуванням ґрунтів, застосуванням адсорбенту MaxiMarin і позакореневим підживленням Гуміфілд + АміноСтар, урожайність становила 6,87 т/га.

На четвертий рік вегетації плантації проса прутіподібного виявились ще більш ефективними для виробничого використання, збільшивши ефективність порівняно з третім роком на 9,72 %. У середньому по досліді вихід енергії з біомасою становив 105,4 ГДж/га. На контрольних варіантах досліді вихід енергії був мінімальним – 97,3 ГДж/га. Різниця між варіантами з вапнуванням та контрольними варіантами становила в середньому 2,20 ГДж/га, що є значною, хоча й знаходиться в межах похибки досліді.

Варіанти із застосуванням вологоутримувача MaxiMarin забезпечували вихід енергії на 8,97 ГДж/га більше, а позакореневе удобрення препаратами, які стимулюють ростові процеси і зменшують негативний вплив стресів на рослини, підвищували показники енерговиходу на 8,36 ГДж/га порівняно з контрольними варіантами.

Найкращі показники виходу енергії з біосировини проса прутіподібного були досягнуті за умов застосування вапнування ґрунту в поєднанні з використанням вологоутримувача MaxiMarin та подальшим позакореневим підживленням гуматами. На варіанті з вапнуванням ґрунту на 25 % від потреби, застосуванням адсорбенту MaxiMarin та позакореневим підживленням Гуміфілд + АміноСтар, вихід енергії з урожаєм становив 116,2 ГДж/га.

Показники визначення якості сухої біомаси рослин проса прутіподібного четвертого року вегетації в умовах 2022 року наведено в таблиці 2.

За результатами оцінки якості сухої речовини проса прутіподібного четвертого року вегетації було виявлено, що в середньому по досліді вміст клітковини в листках становив 33,4 %, а в стеблах – 42,6 %.

Також встановлено, що, як і в попередні роки, вміст клітковини в листках та стеблах залежав від агротехнічних заходів. Вапнування ґрунту підвищило вміст клітковини в листках на 2,39 %, а в стеблах на 1,75 %. Застосування адсорбенту MaxiMarin збільшило цей показник на 1,25 % у листках та на 0,98 % у стеблах, а позакореневе підживлення сприяло підвищенню на 1,02 % та 0,68 % відповідно.

Найкращі показники вмісту клітковини були досягнуті за поєднання застосування адсорбенту MaxiMarin та позакореневого підживлення Гуміфілд з АміноСтар на фоні вапнування ґрунту – 37,1 % у листках та 44,7 % у стеблах.

У середньому по досліді вміст золи в листках рослин четвертого року вегетації становив 10,50 %, а в стеблах – 3,58 %. У варіантах зі внесенням вапна 25 % від потреби, вміст золи в листках зменшився до 9,54 %, а в стеблах – до 2,87 %, що на 1,91 та 1,41 % менше, ніж на контрольних варіантах. Інші фактори також знижували вміст золи, але ці зміни були в межах похибки досліді.

Якість сухої маси рослин проса прутноподібного, % (2022 р.)

Розкислення ґрунту	Застосування адсорбенту	Позакореневе підживлення	Уміст клітковини		Уміст золи	
			в листках	в стеблі	в листках	в стеблі
Без вапнування	Без адсорбенту	Без підживлення	31,5	41,0	12,59	4,48
		Гуміфілд, 50 г/га	31,8	41,4	11,87	4,47
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га	32,1	41,6	11,43	4,25
	МахіМарін гранульований, 30 кг/га	Без підживлення	32,3	41,7	11,05	4,39
		Гуміфілд, 50 г/га	32,3	42,1	11,16	4,07
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га	33,1	42,4	10,59	4,05
Вапнування, 1,6 т/га	Без адсорбенту	Без підживлення	33,0	42,2	10,47	3,50
		Гуміфілд, 50 г/га	34,0	43,0	10,34	3,33
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га	34,2	43,3	9,51	3,16
	МахіМарін гранульований, 30 кг/га	Без підживлення	34,1	43,6	10,28	2,66
		Гуміфілд, 50 г/га	35,2	43,9	9,02	2,57
		Гуміфілд, 50 г/га + АміноСтар, 1,0 л/га	37,1	44,7	7,63	2,02
НІР _{0,05}			5,4	5,7	1,1	0,6

Не можна недооцінювати позитивну роль адсорбенту МахіМарін та позакореневого підживлення Гуміфілд + АміноСтар, які разом з вапнуванням забезпечували найнижчий вміст золи в листках (7,63 %) та стеблах (2,02 %).

Отже, досліджувані технологічні елементи позитивно впливають на якість сировини та зменшують вміст золи, особливо на варіантах з вапнуванням ґрунтів 25 % від потреби, що свідчить про зменшення інтенсивності поглинання деяких металів і їх накопичення в сухій речовині проса прутноподібного.

Окремо слід звернути увагу на закономірності впливу фотосинтетичних показників рослин на формування ними врожайності біомаси. Для цього ми провели визначення регресійних залежностей між урожайністю та показниками фотосинтетичного потенціалу рослин (ФП) (рис. 4) та врожайністю і показниками чистої продуктивності фотосинтезу (ЧФП) (рис. 5).

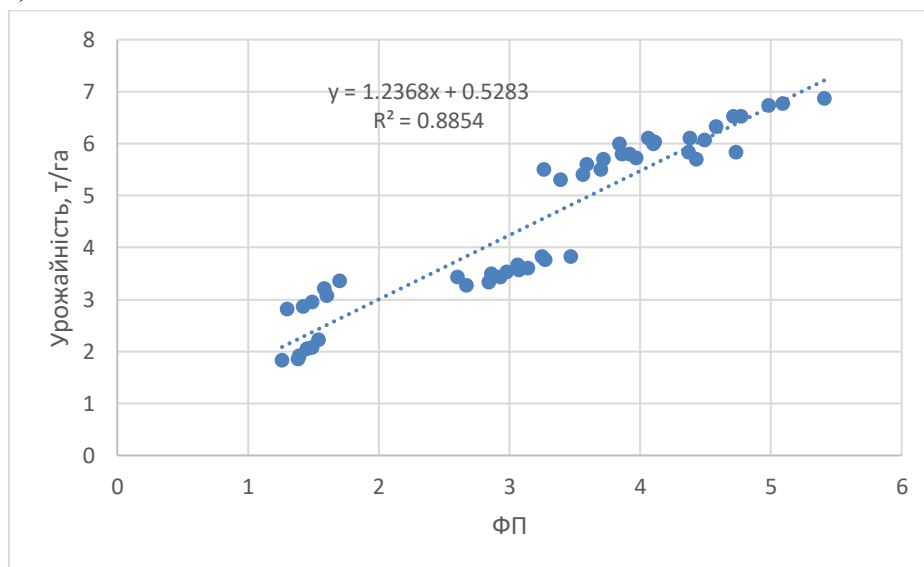


Рис. 4. Рівняння регресії між урожайністю та показниками фотосинтетичного потенціалу проса прутноподібного

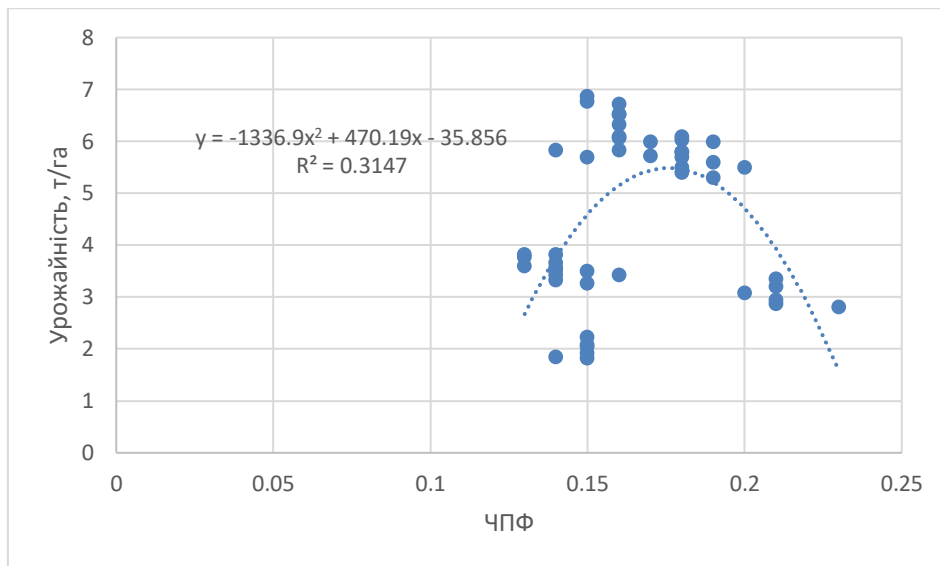


Рис. 5. Рівняння регресії між урожайністю та показниками чистої продуктивності фотосинтезу проса прутіподібного

Як бачимо, між урожайністю та фотосинтетичним потенціалом посівів є досить значна залежність, з коефіцієнтом кореляції 0,94, що вказує на дуже сильний кореляційний зв'язок між цими ознаками. Водночас чиста продуктивність фотосинтезу також впливає на формування врожайності, оскільки цей показник враховує значення накопичення біомаси. Проте, ми не спостерігали очевидної сильної кореляційної залежності.

Зважаючи на особливості впливу вирахованих показників проведемо встановлення множинної регресійної залежності на формування врожайності проса прутіподібного (табл. 3).

Таблиця 3

Результати розрахунків множинної регресії між урожайністю та показниками фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу

Показник	Коефіцієнти рівняння	Стандартні помилки β -коефіцієнтів	Коефіцієнти рівняння регресії	Стандартні похибки коефіцієнтів рівняння регресії	t-критерії	Імовірність нульової гіпотези для коефіцієнтів рівняння регресії
Вільний член рівняння	–	–	–3,25	0,21	–15,8	0,00
ФП	1,02	0,02	1,34	0,02	60,6	0,00
ЧПФ	0,33	0,02	21,0	1,068	19,6	0,00

Отже, рівняння множинної регресії по прогнозуванню урожайності проса прутіподібного залежно від показників фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу матиме наступний вигляд:

$$y = -3,25 + 1,34 \text{ ФП} + 21,0 \text{ ЧПФ}$$

Усі коефіцієнти рівняння достовірні на 5 %-му рівні значущості ($p\text{-level} < 0,05$). Це рівняння пояснює майже 98 % ($R^2 = 0,98$) варіації залежної змінної.

Висновки

За результатами досліджень урожайності плантацій проса прутіподібного встановлено, що на четвертий рік вегетації рослини досягли свого піку продуктивності. Якщо на третій рік вегетації продуктивність зростає на 60 % порівняно з другим роком, то на четвертий рік приріст становив лише 8,94 %. Це дає змогу отримувати в середньому 6,25 т/га сухої речовини.

Вапнування ґрунту було найбільш ефективним на перший рік вегетації, коли коренева система рослин перебувала в зоні внесення вапна, що сприяло утворенню додаткових 0,12 т/га сухої речовини. На четвертий рік заходи з розкислення ґрунту мали значніший вплив, збільшуючи врожайність на 0,14 т/га. Цей вплив можна пояснити підвищенням рівня зволоження ґрунту в останні два роки, коли кількість опадів зросла до рівня багаторічної норми.

На четвертий рік вегетації помітно посилюється вплив усіх агротехнічних заходів на продуктивність плантацій проса прутноподібного. Коренева система рослин активно освоювала верхні шари ґрунту в пошуках вологи та поживних речовин, що посилювало ефект від вапнування та застосування адсорбенту. Виявлено, що у варіанті вапнування ґрунтів та використання адсорбенту MaxiMargin гранульований разом з позакореневим підживленням Гумат калію (Гуміфілд) і антистресантом АміноСтар, урожайність становила 6,87 т/га.

У варіанті вапнування ґрунтів, 25 % від потреби, із застосуванням адсорбенту MaxiMargin гранульований та позакореневим підживленням, вихід енергії з урожаєм досягав 116,2 ГДж/га.

Щодо вмісту клітковини, найкращі показники були отримані за умови використання вапна з адсорбентом MaxiMargin гранульований та позакореневим підживленням – 37,1 % у листках та 44,7 % у стеблах.

У варіантах з вапнуванням ґрунту вміст золи в листках проса прутноподібного становив 9,54 %, а в стеблах – 2,87 %, що на 1,91 та 1,41 % менше, ніж у варіантах без вапнування. Інші фактори також показували зниження вмісту золи, але в межах похибки досліду.

Установлено рівняння множинної регресії для прогнозування врожайності проса прутноподібного залежно від фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу: $y = -3,25 + 1,34 \text{ ФП} + 21,0 \text{ ЧПФ}$. Усі коефіцієнти рівняння достовірні на 5 %-му рівні значущості, і воно пояснює майже 98 % варіації залежної змінної.

Використана література

1. Sadeghpour A., Hashemi M., DaCosta M. et al. Assessing winter cereals as cover crops for weed control in reduced-tillage switchgrass establishment. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 62. P. 522–525. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.09.027
2. Kumar P., Lai L., Battaglia M. L. et al. Impacts of nitrogen fertilization rate and landscape position on select soil properties in switchgrass field at four sites in the USA. *CATENA*. 2019. Vol. 180. P. 183–193. doi: 10.1016/j.catena.2019.04.028
3. Gurlitsky L. E., Sadeghpour A., Hashemi M. et al. Biomass vs. quality tradeoffs for switchgrass in response to fall harvesting period. *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 63. P. 311–315. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.10.012
4. Kline L., Johnson A., Kim P. et al. Monitoring switchgrass composition to optimize harvesting periods for bioenergy and value-added products. *Biomass and Bioenergy*. 2013. Vol. 56. P. 29–37. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.04.023
5. Karlsson S., Åmand L. E., Liske J. Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler. *Fuel*. 2015. Vol. 139. P. 482–493. doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.007
6. Sanderson M. A., Reed R. L., Ocumpaugh W. R. et al. Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas. *Bioresource Technology*. 1999. Vol. 67, Iss. 3. P. 209–219. doi: 10.1016/S0960-8524(98)00132-1
7. Ameen A., Liu J., Han L., Xie G. H. Effects of nitrogen rate and harvest time on biomass yield and nutrient cycling of switchgrass and soil nitrogen balance in a semiarid sandy wasteland. *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 136. P. 1–10. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.066
8. Kiss Trócsányi Zs., Fieldsend A. F., Wolf D. D. Yield and canopy characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as influenced by cutting management. *Biomass and Bioenergy*. 2009. Vol. 33, Iss. 3. P. 442–448. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.014

9. Weidhuner A., Zandvakili O. R., Krausz R. et al. Continuous no-till decreased soil nitrous oxide emissions during corn years after 48 and 50 years in a poorly-drained Alfisol. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 838, Part 4. Article 156296. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156296
10. Sanderson M. A., Reed R. L., McLaughlin S. B. et al. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. *Bioresource Technology*. 1996. Vol. 56, Iss. 1. P. 83–93. doi: 10.1016/0960-8524(95)00176-X
11. Bransby D. I. Switchgrass profile. Bioenergy Feedstock Information Network (BFIN), Oak Ridge National Laboratory. 2005. URL: <http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/switchgrass-profile.html>
12. Casler M. D., Boe A. R. Cultivar × environment interactions in switchgrass. *Crop Science*. 2003. Vol. 43, Iss. 6. P. 2226–2233. doi: 10.2135/cropsci2003.2226
13. Cassida K. A., Muir J. P., Hussey M. A. et al. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in South Central US environments. *Crop Science*. 2005. Vol. 45, Iss. 2. P. 682–692. doi: 10.2135/cropsci2005.0682
14. Fuentes R. G., Taliaferro C. M. Biomass yield stability of switchgrass cultivars. *Trends in new crops and new uses* / J. Janick, A. Whipkey (Eds.). Alexandria, VA : ASHS Press, 2002. P. 276–282.
15. Garcia-Ciudad A., Garcia-Criado B., Perez-Corona M. E. et al. Application of near-infrared reflectance spectroscopy to chemical analysis of heterogeneous and botanically complex grassland samples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1993. Vol. 63, Iss 4. P. 419–426. doi: 10.1002/jsfa.2740630407
16. Garten C. T., Wullschlegel S. D. Soil carbon dynamics beneath switchgrass as indicated by stable isotope analysis. *Journal of Environmental Quality*. 2000. Vol. 29, Iss. 2. P. 645–653. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900020036x
17. Griffin J. L., Jung G. A. Leaf and stem forage quality of big bluestem and switchgrass. *Agronomy Journal*. 1983. Vol. 75. P. 723–726. doi: 10.2134/agronj1983.00021962007500050002x
18. Hall K. E., George J. R., Riedl R. R. Herbage dry matter yields of switchgrass, big bluestem, and indiagrass with N fertilization. *Agronomy Journal*. 1982. Vol. 74, Iss. 1. P. 47–51. doi: 10.2134/agronj1982.00021962007400010014x
19. Heckathorn S. A., DeLucia H. Retranslocation of shoot nitrogen to rhizomes and roots in prairie grasses may limit loss of N to grazing and fire during drought. *Functional Ecology*. 1996. Vol. 10, Iss. 3. P. 396–400. doi: 10.2307/2390289
20. Heggenstaller A. H., Moore K. J., Liebman M., Anex R. P. Nitrogen influences biomass and nutrient partitioning by perennial, warm-season grasses. *Agronomy Journal*. 2009. Vol. 101, Iss. 6. P. 1363–1371. doi: 10.2134/agronj2008.0225x
21. Jung G. A., Shaffer J. A., Stout W. L. Switchgrass and big bluestem responses to amendments on strongly acid soil. *Agronomy Journal*. 1988. Vol. 80, Iss. 4. P. 669–676. doi: 10.2134/agronj1988.00021962008000040023x
22. Kering M. K., Butler T. J., Biermacher J. T. et al. Effect of potassium and nitrogen fertilizer on switchgrass productivity and nutrient removal rates under two harvest systems on a low potassium soil. *BioEnergy Research*. 2013. Vol. 6, Iss. 1. P. 329–335. doi: 10.1007/s12155-012-9261-8
23. Lee D. K., Owens V. N., Doolittle J. J. Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on conservation reserve program land. *Agronomy Journal*. 2007. Vol. 99, Iss. 2. P. 462–468. doi: 10.2134/agronj2006.0152
24. Lemus R., Brummer E. C., Burras C. L. et al. Effects of nitrogen fertilization on biomass yield and quality in large fields of established switchgrass in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32. P. 1187–1194. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.02.016
25. Lemus R., Brummer E.C., Moore K. J. et al. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*. 2002. Vol. 23. P. 433–442. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00073-9

26. Liebig M. A., Kronberg S. L., Gross J. R. Effects of normal and altered cattle urine on short-term greenhouse gas flux from mixed-grass prairie in the Northern Great Plains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2008. Vol. 125, Iss. 1–4. P. 57–64. doi: 10.1016/j.agee.2007.11.004
27. McLaughlin S. B., de la Torre Ugarte D. G., Garten C. T. et al. High-value renewable energy from prairie grasses. *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36, Iss. 10. P. 2122–2129. doi: 10.1021/es010963d
28. McLaughlin S. B., Kszos L. A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*. 2005. Vol. 28, Iss. 6. P. 515–535. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.05.006
29. McLaughlin S. B., Samson R., Bransby D., Wiseloge A. Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. *Abstracts of BioEnergy'96 - The Seventh National Bioenergy Conference: partnerships to develop and apply biomass technologies* (Nashville, TN, September 15–20, 1996). Nashville, TN.
30. McLaughlin S. B., Walsh M. E. Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*. 1998. Vol. 14, Iss. 4. P. 317–324. doi: 10.1016/S0961-9534(97)10066-6
31. Присяжнюк О. І., Климович Н. М., Полуніна О. В. та ін. Методологія і організація наукових досліджень у сільському господарстві та харчових технологіях. Київ : Нілан-ЛТД, 2021. 300 с.
32. Ермантраут Е. Р., Присяжнюк О. І., Шевченко І. Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 6.0: методичні вказівки. Київ : ПоліграфКонсалтинг, 2007. 56 с.
33. Фучило Я. Д., Сінченко В. М., Ганженко О. М. та ін. Методологія дослідження енергетичних плантацій верб і тополь / за ред В. М. Сінченка. Київ : Логос, 2018. 240 с.

References

1. Sadeghpour, A., Hashemi, M., DaCosta, M., Gorklitsky, L. E., Jahanzad, E., & Herbert, S. J. (2014). Assessing winter cereals as cover crops for weed control in reduced-tillage switchgrass establishment. *Industrial Crops and Products*, 62, 522–525. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.09.027
2. Kumar, P., Lai, L., Battaglia, M. L., Kumar, S., Owens, V., Fike, J., ... Viands, D. (2019). Impacts of nitrogen fertilization rate and landscape position on select soil properties in switchgrass field at four sites in the USA. *CATENA*, 180, 183–193. doi: 10.1016/j.catena.2019.04.028
3. Gorklitsky, L. E., Sadeghpour, A., Hashemi, M., Etemadi, F., & Herbert, S. J. (2015). Biomass vs. quality tradeoffs for switchgrass in response to fall harvesting period. *Industrial Crops and Products*, 63, 311–315. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.10.012
4. Lindsey, K., Johnson, A., Kim, P., Jackson, S., & Labbé, N. (2013). Monitoring switchgrass composition to optimize harvesting periods for bioenergy and value-added products. *Biomass and Bioenergy*, 56, 29–37. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.04.023
5. Karlsson, S., Åmand, L. E., & Liske, J. (2015). Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler. *Fuel*, 139, 482–493. doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.007
6. Sanderson, M. A., Reed, R. L., Ocumpaugh, W. R., Hussey, M. A., Van Esbroeck, G., Read, J. C., ... Hons, F. M. (1999). Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas. *Bioresource Technology*, 67(3), 209–219. doi: 10.1016/S0960-8524(98)00132-1
7. Ameen, A., Liu, J., Han, L., & Xie, G. H. (2019). Effects of nitrogen rate and harvest time on biomass yield and nutrient cycling of switchgrass and soil nitrogen balance in a semiarid sandy wasteland. *Industrial Crops and Products*, 136, 1–10. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.066
8. Kiss Trócsányi, Zs., Fieldsend, A. F., & Wolf, D. D. (2009). Yield and canopy characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as influenced by cutting management. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 442–448. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.014

9. Weidhuner, A., Zandvakili, O. R., Krausz, R., Crittenden, S. J., Deng, M., Hunter, D., & Sadeghpour, A. (2022). Continuous no-till decreased soil nitrous oxide emissions during corn years after 48 and 50 years in a poorly-drained Alfisol. *Science of The Total Environment*, 838(4), Article 156296. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156296
10. Sanderson, M. A., Reed, R. L., McLaughlin, S. B., Wullschleger, S. D., Conger, B. V., Parrish, D. J., ... Tischler, C. R. (1996). Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. *Bioresource Technology*, 56(1), 83–93. doi: 10.1016/0960-8524(95)00176-X
11. Bransby, D. I. (2005). *Switchgrass profile*. *Bioenergy Feedstock Information Network (BFIN), Oak Ridge National Laboratory*. Retrieved from <http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/switchgrass-profile.html>
12. Casler, M. D., & Boe, A. R. (2003). Cultivar × environment interactions in switchgrass. *Crop Science*, 43(6), 2226–2233. doi: 10.2135/cropsci2003.2226
13. Cassida, K. A., Muir, J. P., Hussey M. A. et al. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in South Central US environments. *Crop Science*, 45(2), 682–692. doi: 10.2135/cropsci2005.0682
14. Fuentes, R. G., & Taliaferro, C. M. (2002). Biomass yield stability of switchgrass cultivars. In J. Janick, & A. Whipkey (Eds.), *Trends in new crops and new uses* (pp. 276–282). Alexandria, VA: ASHS Press.
15. García-Ciudad, A., García-Criado, B., Pérez-Corona, M. E., De Aldana, B. R. V., & Ruano-Ramos, A. M. (1993). Application of near-infrared reflectance spectroscopy to chemical analysis of heterogeneous and botanically complex grassland samples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 63(4), 419–426. doi: 10.1002/jsfa.2740630407
16. Garten, C. T., & Wullschleger, S. D. (2000). Soil carbon dynamics beneath switchgrass as indicated by stable isotope analysis. *Journal of Environmental Quality*, 29(2), 645–653. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900020036x
17. Griffin, J. L., & Jung, G. A. (1983). Leaf and stem forage quality of big bluestem and switchgrass. *Agronomy Journal*, 75, 723–726. doi: 10.2134/agronj1983.00021962007500050002x
18. Hall, K. E., George, J. R., & Riedl, R. R. (1982). Herbage dry matter yields of switchgrass, big bluestem, and indiagrass with N fertilization. *Agronomy Journal*, 74(1), 47–51. doi: 10.2134/agronj1982.00021962007400010014x
19. Heckathorn, S. A., & DeLucia, H. (1996). Retranslocation of shoot nitrogen to rhizomes and roots in prairie grasses may limit loss of N to grazing and fire during drought. *Functional Ecology*, 10(3), 396–400. doi: 10.2307/2390289
20. Heggenstaller, A. H., Moore, K. J., Liebman, M., & Anex, R. P. (2009). Nitrogen influences biomass and nutrient partitioning by perennial, warm-season grasses. *Agronomy Journal*, 101(6), 1363–1371. doi: 10.2134/agronj2008.0225x
21. Jung, G. A., Shaffer, J. A., & Stout, W. L. (1988). Switchgrass and big bluestem responses to amendments on strongly acid soil. *Agronomy Journal*, 80(4), 669–676. doi: 10.2134/agronj1988.00021962008000040023x
22. Kering, M. K., Butler, T. J., Biermacher J. T. et al. Effect of potassium and nitrogen fertilizer on switchgrass productivity and nutrient removal rates under two harvest systems on a low potassium soil. *BioEnergy Research*, 6(1), 329–335. doi: 10.1007/s12155-012-9261-8
23. Lee, D. K., Owens, V. N., & Doolittle, J. J. (2007). Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on conservation reserve program land. *Agronomy Journal*, 99(2), 462–468. doi: 10.2134/agronj2006.0152
24. Lemus, R., Charles Brummer, E., Lee Burras, C., Moore, K. J., Barker, M. F., & Molstad, N. E. (2008). Effects of nitrogen fertilization on biomass yield and quality in large fields of established switchgrass in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*, 32, 1187–1194. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.02.016
25. Lemus, R., Brummer, E. C., Moore, K. J., Molstad, N. E., Burras, C. L., & Barker, M. F. (2002). Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy*, 23, 433–442. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00073-9

26. Liebig, M. A., Kronberg, S. L., & Gross, J. R. (2008). Effects of normal and altered cattle urine on short-term greenhouse gas flux from mixed-grass prairie in the Northern Great Plains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125(1–4), 57–64. doi: 10.1016/j.agee.2007.11.004
27. McLaughlin, S. B., de la Torre Ugarte, D. G., Garten, C. T., Lynd, L. R., Sanderson, M. A., Tolbert, V. R., & Wolf, D. D. (2002). High-value renewable energy from prairie grasses. *Environmental Science & Technology*, 36(10), 2122–2129. doi: 10.1021/es010963d
28. McLaughlin, S. B., & Kszos, L. A. (2004). Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*, 28(6), 515–535. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.05.006
29. McLaughlin, S. B., Samson, R., Bransby, D., & Wiselogel, A. (1996). Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. In *Abstracts of BioEnergy'96 – The Seventh National Bioenergy Conference: partnerships to develop and apply biomass technologies* (Nashville, TN, September 15–20, 1996). Nashville, TN.
30. McLaughlin, S. B., & Walsh, M. E. (1998). Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 14(4), 317–324. doi: 10.1016/S0961-9534(97)10066-6
31. Prysiazniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Kyiv: Nilan-LTD. [In Ukrainian]
32. Ermantraut, E. R., Prysiazniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic study data in the Statistica 6.0 software suite*. Kyiv: PolihrafKonsaltnh. [In Ukrainian]
33. Fuchylo, Ya. D., Sinchenko, V. M., Hanzhenko, O. M., Humentyk, M. Ya., Pyrkin, V. M., Prysiazniuk, O. I., ... Tkachenko, A. M. (2018). *Research methodology of willow and poplar energy plantations*. V. M. Sinchenko (Ed.). Kyiv: Lohos. [In Ukrainian]

UDC 633.9:631.54

Prysiazniuk, O. I.^{1*}, Musich, V. V.¹, Kostyna, T. P.², Kononiuk, N. O.¹, Cherniak, M. O.¹, Honcharuk, O. M.¹, & Kachura, Ye. V.³ (2023). Yield and quality of switchgrass in a long-term experiment on low-productive soils in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 31, 110–125. [In Ukrainian]

¹*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, *e-mail: ollpris@gmail.com*

²*LLC BASF T.O.V., 19 Mykola Mikhnovskiy Blvd., Kyiv, 01042, Ukraine*

³*Institute of Agroecology and Environmental Management, NAAS of Ukraine, 12 Metrolohichna St., Kyiv, 03143, Ukraine*

Purpose. To establish the influence of the elements of the cultivation technology on the yield and quality of switchgrass biomass. **Methods.** The research was conducted in 2019–2022 at the Uladivske-Liulyntsi Experimental and Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences according to generally accepted methods. Switchgrass variety ‘Morozko’ was grown according to a three-factor field experiment design: factor A: soil deoxidation: 1) without liming, 2) application of lime, 1.6 t/ha; factor B: adsorbent: 1) without adsorbent, 2) application of MaxiMarin granulated, 30 kg/ha; factor B: foliar feeding: 1) without feeding, 2) foliar application of Humifield, 50 g/ha, 3) Gumifield, 50 g/ha + AminoStar, 1.0 l/ha. The adsorbent was introduced two weeks before sowing the crop locally in the rows. Foliar application of fertilizers was carried out in the tillering stage and repeated after two weeks. **Results.** According to the results of research on the productivity of switchgrass plantations, it was established that the plants reached their peak productivity in the fourth year of vegetation. If in the third year of cultivation, productivity increased by 60% compared to the second year. In the fourth year, the increase was only 8.94%. This makes it possible to obtain a yield of dry matter of

6.25 t/ha. Soil liming was most effective in the first year of vegetation, when the root system of plants was in the lime application zone, which contributed to the formation of an additional 0.12 t/ha of dry matter. In the fourth year, measures to deoxidize the soil had a more significant impact, increasing the yield by 0.14 t/ha. This effect can be explained by an increase in the level of soil moisture in the last two years, when the amount of precipitation increased to the level of the multi-year rate. In the fourth year of vegetation, the influence of all agrotechnical measures on the productivity of switchgrass plantations increased significantly. The root system of plants actively used the upper soil layers to uptake moisture and nutrients, which increased the effect of liming and the adsorbent. **Conclusions.** It was found that combined application of lime and adsorbent MaxiMarin to the soil and foliar application of Humate potassium (Humifield) and the anti-stressor AminoStar, the yield of switchgrass was 6.87 t/ha. In the treatment with soil liming (25% of the need), adsorbent and foliar application of fertilizers, the yield of energy from biomass reached 116.2 GJ/ha. Regarding fiber content, the best results were obtained in the treatment with lime, adsorbent, and foliar feeding: 37.1% in leaves and 44.7% in stems. In the treatment with soil liming, the ash content in the leaves of switchgrass was 9.54%, and in the stems, it was 2.87%, which is 1.91 and 1.41% less than in the treatment without liming. Other factors also provided a decrease in ash content; however, within experimental error. A multiple regression equation was established for predicting the yield of switchgrass depending on the photosynthetic potential and the net productivity of photosynthesis: $y = -3.25 + 1.34 PP + 21.0 NPP$. All coefficients of the equation are significant at the 5% level of significance, and it explains almost 98% of the variation in the dependent variable.

Keywords: soil liming; application of adsorbent; foliar application of fertilizers; dry matter yield; energy yield; biomass quality.

Надійшла / Received 16.11.2023

Погоджено до друку / Accepted 30.11.2023